

# СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ С ДИБОРИДОМ ТИТАНА И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

*Кобзарева Т.Ю., Райков С.В., Будовских Е.А.,*

*Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Романов Д.А.*

*Руководитель - д.ф. - м.н., профессор Громов В.Е.*

Сибирский государственный индустриальный университет,

г. Новокузнецк

**kobzarevatanya@mail.ru**

В статье представлены результаты исследования структуры, элементного и фазового состава упрочненных слоев после комбинированной обработки титанового сплава ВТ6 путем электровзрывного науглероживания с порошком диборида титана и последующей электронно-пучковой обработки в различных режимах.

Важную роль в машиностроении и металлургии играют вопросы, касающиеся упрочнения поверхностей деталей из металлов и сплавов [1]. Все большее применение в производстве находят технологии упрочнения с использованием концентрированных потоков энергии [2, 3]. Перспективным методом формирования покрытий является электровзрывное легирование (ЭВЛ) [4]. Оно приводит к многократному повышению физико-механических и эксплуатационных свойств. Дополнительное повышение свойств поверхностного слоя материала после ЭВЛ возможно при последующей электронно-пучковой обработке (ЭПО) [5]. ЭПО приводит к изменениям структурно-фазового состояния поверхностных слоев и улучшению прочностных свойств материала, недостижимому при традиционных методах поверхностной обработки [5].

В качестве обрабатываемого материала использовали образцы титанового сплава ВТ6. Электровзрывное науглероживание с диборидом титана осуществляли на установке ЭВУ 60/10. Для улучшения свойств поверхности ЭВЛ проводили дополнительную электронно-пучковую обработку (ЭПО) сплава ВТ6 на установке «СОЛО» [6].

Исследования методами сканирующей микроскопии показали, что на поверхности зоны ЭВЛ формируется покрытие с высокоразвитым рельефом (рисунок 1), образованное частицами продуктов взрыва углеграфитовых волокон и порошка диборида титана из тыла струи. В структуре рельефа выделяются: следы радиального течения расплава из центра зоны легирования к периферии вследствие неоднородного силового воздействия плазменной струи на поверхность, микрократеры и микропоры (рисунок 1,

б), наплывы и наслоения (рисунок 1, в), микротрещины (рисунок 1, в, г), стержни различных размеров и частицы глобулярной формы (рисунок 1, е).

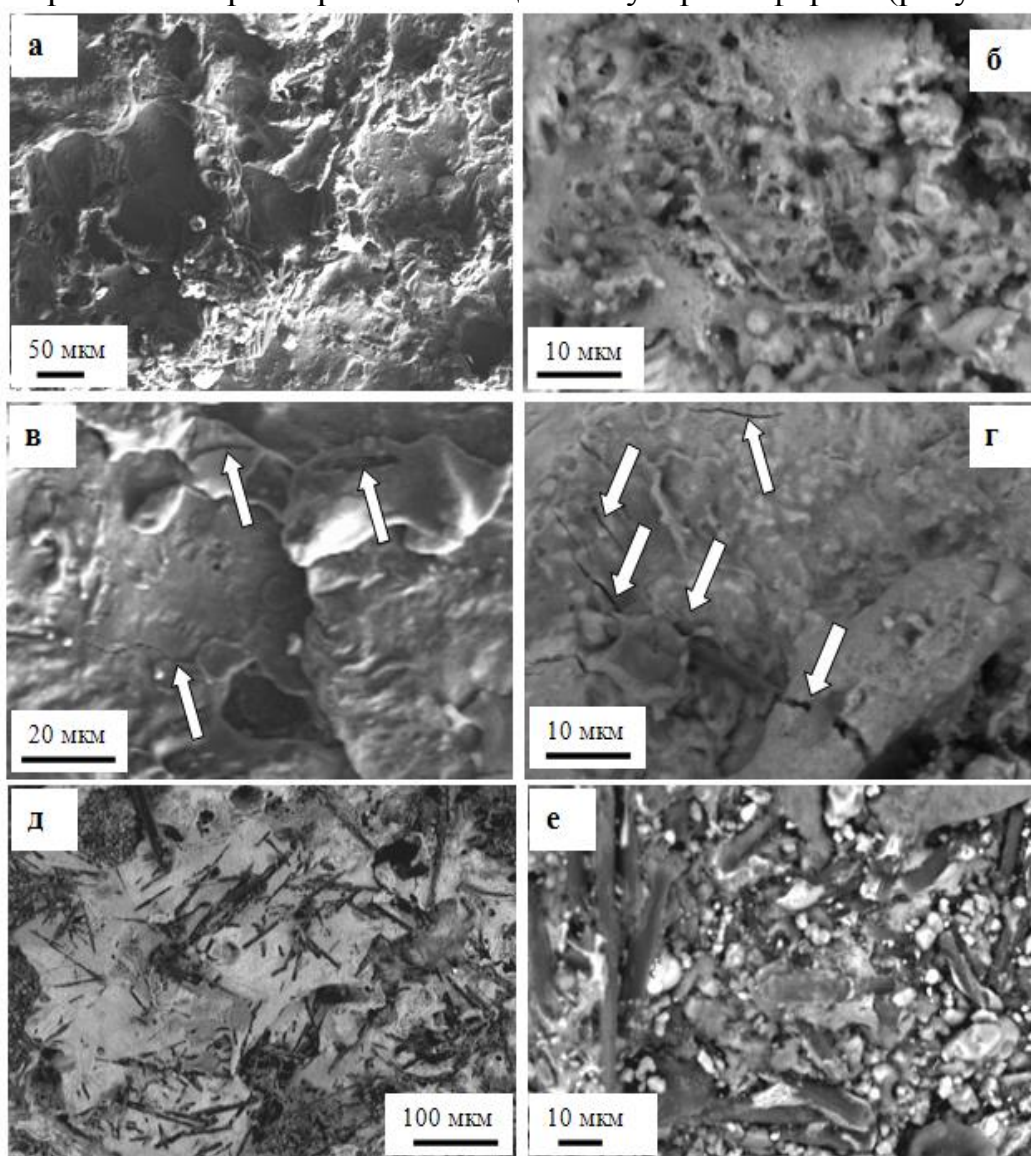


Рисунок 1. Структура поверхности титанового сплава ВТ6 после ЭВЛ с навеской порошка диборида титана

В результате исследований установлено, что гомогенизирующая обработка образцов электронным пучком сопровождается существенным преобразованием поверхности образцов. В центральной части зоны воздействия пучка электронов (область, диаметр которой увеличивается от 10 мм при  $E_s = 45 \text{ Дж/см}^2$  до 18 мм при  $E_s = 60 \text{ Дж/см}^2$ ) выглаживается рельеф поверхности, исчезают микрократеры, микрокапли, наплывы, существенно уменьшается количество микротрещин (рисунок 2). На рисунке 2 представлено изображение структуры поверхности титанового сплава ВТ6 после ЭВЛ с навеской порошка диборида титана и последующей электронно-

пучковой обработке по режимам: (а) -  $E_s=45$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 100$  мкс,  $N = 10$ ,  $0,3$  с<sup>-1</sup>; (б) -  $E_s=60$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 100$  мкс,  $N = 10$ ,  $0,3$  с<sup>-1</sup>.

При облучении поверхности электровзрывного легирования электронным пучком по режиму  $E_s= 45$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 100$  мкс,  $N = 10$  имп.,  $0,3$  с<sup>-1</sup> в поверхностном слое формируется поликристаллическая структура, размер зерен которой изменяется в широких пределах от 5 мкм до 120 мкм.

Особенностью крупных зерен является наличие в их объеме ячеек высокоскоростной кристаллизации (размер ячеек 0,5-1 мкм). Облучение поверхности электровзрывного легирования электронным пучком по режиму  $E_s= 60$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 100$  мкс,  $N = 10$  имп.,  $0,3$  с<sup>-1</sup> приводит к формированию двухуровневой зеренной структуры. Зерна первого уровня

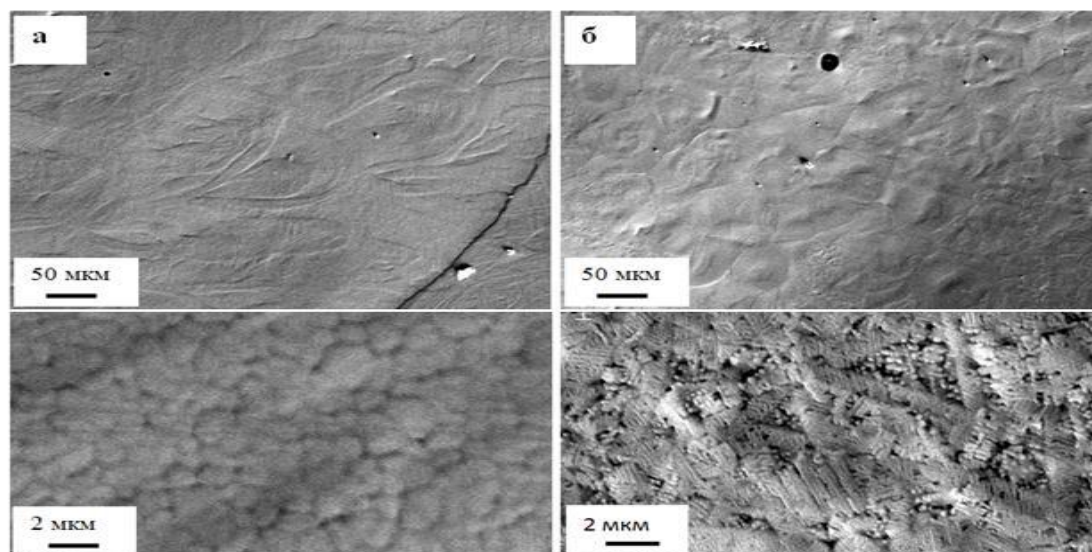


Рисунок 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности титанового сплава ВТ6 после комбинированной обработки

изменяются в пределах 5-60 мкм, при среднем размере зерна 21 мкм. В объеме наиболее крупных зерен этого масштабного уровня выявляется структура ячеистой кристаллизации; размер ячеек 0,3-0,6 мкм. Зерна второго масштабного (субмикронного) уровня формируют протяженные прослойки (размеры зерен 0,5-1,0 мкм при среднем размере 0,7 мкм). В объеме зерен второго масштабного уровня выявляется пластинчатая структура, подобная структуре дендритной кристаллизации. Еще одной особенностью структуры таких зерен является присутствие по границам включений второй фазы, которыми являются прослойки графита.

Состояние объема слоя, легированного методом электрического взрыва проводника, изучали, используя поперечные шлифы [7, 8]. На рисунке 3 приведено изображение структуры поперечного шлифа, подвергнутого ЭВЛ с навеской порошка диборида титана, на котором наблюдается высокий уровень шероховатости: толщина легированного слоя 15-65 мкм (рисунок 3, а). Вторым заметным элементом поверхностного слоя являются микротрещины и микрократеры (рисунок 3, б, указаны стрелками). Причем

микротрещины всегда наблюдаются в объеме легированного слоя (рисунок 3, слой 1) и никогда - в переходном слое (рисунок 3, слой 2). Детальные исследования структуры поперечного шлифа позволили выявить высокий уровень структурной неоднородности: обнаруживаются участки легированного слоя с преимущественно глобулярной структурой (рисунок 3, а) и с дендритной структурой (рисунок 3, б). К негативным элементам легированного слоя следует отнести осколки УГВ, макро- и микропоры, пустоты.

Таким образом, исследования поперечных шлифов титанового сплава ВТ6 показали, что ЭВЛ приводит к формированию поверхностного слоя с высоким уровнем структурной неоднородности, неоднородности по элементному и фазовому составу.

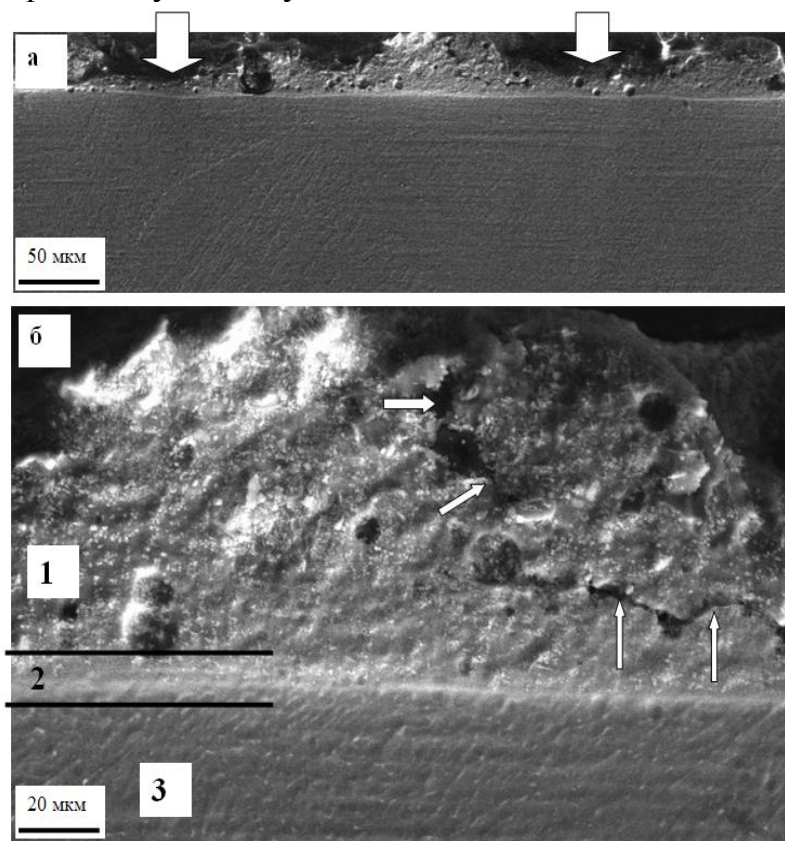


Рисунок 3. Структура поперечного сечения после ЭВЛ

Кратковременность воздействия потока плазмы ( $\sim 100$  мкс) на поверхность материала и высокие скорости последующего охлаждения приводят к формированию слоистой структуры. В упрочняемом объеме выявляются легированный слой, переходный слой и слой термического влияния, плавно переходящий в основной объем материала.



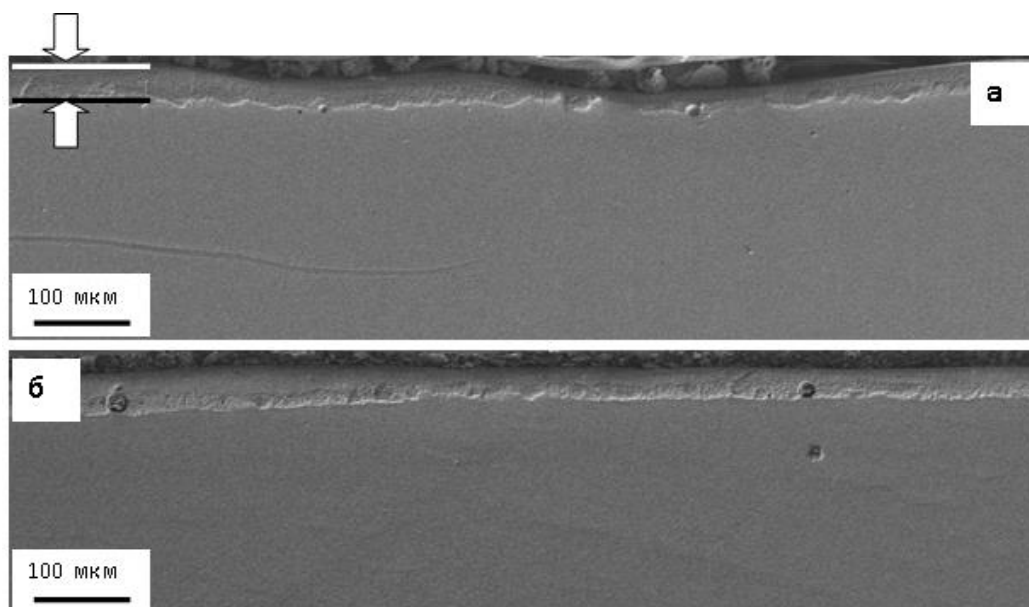


Рисунок 4. Электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного сечения титанового сплава ВТ6 после ЭВЛ и ЭПО

Последующая обработка поверхности ЭВЛ высокоинтенсивным электронным пучком приводит к снижению степени шероховатости поверхности упрочнения и к выравниванию толщины упрочняемого слоя (рисунок 4). Толщина упрочняемого слоя после ЭПО изменяется в пределах 20-50 мкм и уменьшается с ростом  $E_s$ . Плавление упрочняемого слоя электронным пучком приводит к практически полному устранению осколков углеграфитового волокна из объема легированного слоя, т.е. способствует гомогенизации упрочняемого материала.

Высокоскоростные нагрев, плавление и последующие кристаллизация и охлаждение, реализующиеся при ЭПО, приводят к формированию многослойной структуры: в поверхностном слое формируется структура дендритного типа; в промежуточном – дендритно-глобулярного типа; в переходном слое – зеренно- субзеренного типа.

Выполненные в работе исследования структуры поверхностного слоя титанового сплава ВТ6, подвергнутого электровзрывному науглероживанию с диборидом титана и последующей электронно-пучковой обработке, позволяют сделать следующие заключения: 1. ЭВЛ титанового сплава ВТ6 приводит к формированию высокопористого покрытия, содержащего большое количество капельной фракции, микрократеров и микротрещин; 2. Методами электронной дифракционной микроскопии выполнены послойные (анализировали слои, расположенные на глубине 8-10 мкм и 40-50 мкм) исследования структурно-фазового состояния образцов титанового сплава ВТ6. Показано, что в легированном слое формируется многофазная структура субмикро- и наноразмерного диапазона зеренного типа. Включения карбида титана практически бездефектны; в зернах  $\alpha$ -титана присутствует дислокационная субструктура, выявляются частицы

упрочняющих фаз. В зернах титанового сплава ВТ6 формируется структура пластинчатого типа (поперечные размеры пластин 15-30 нм).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ научного проекта №13-02-12009 офи\_м и госзадания Минобрнауки № 2708ГЗ.*

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ИСТОЧНИКОВ:

1. Обеспечение надежности конструкций из титановых сплавов / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, Б.И. Долотов и др. / Под ред. В.И. Муравьева. – М.: «Эком», 2009. – 752 с.
2. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки металлов. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
3. Сизов И.Г., Смирнягина Н.Н., Семенов А.П. Особенности электронно-лучевого борирования сталей // Металловедение и терм.обработ. металлов. – 1999. – № 12. – С. 8–11.
4. Будовских Е.А., Сарычев В.Д., Громов В.Е. и др. Основы технологии обработки поверхности материалов импульсной гетерогенной плазмой. – Новокузнецк: Изд. СибГИУ, 2002. – 170 с.
5. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке / Е.А. Будовских, Е.С. Ващук, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов и др. / Под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2011. – 212 с.
6. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Изв. вузов. Физика. – 2008. – №5. – С. 60–70.
7. Аношкин Н.Ф. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
8. Мальцев М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1970. – 364 с.